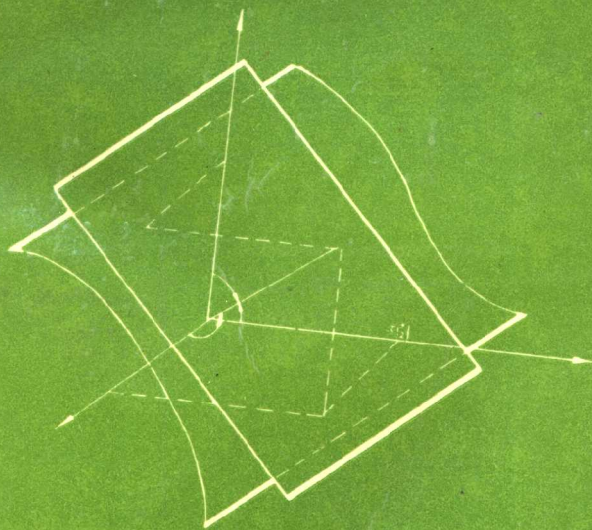


高等岩石 力学理论

王维纲 编著



冶金工业出版社

内 容 提 要

本书从五个方面系统地介绍了岩石力学与工程的新理论和新方法。这五个方面包括岩石分级和聚类分析、岩石断裂力学和损伤理论基础、岩石的塑性和粘性理论、岩体工程的可靠性分析和块体理论的基本原理。书中精选的实例可供解决岩石力学与工程的实际问题借鉴。本书可供从事土木、岩土、水利、采矿、矿建、交通和国防等部门的工程技术人员和科研设计人员使用,也可作为高等院校的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

高等岩石力学理论 / 王维纲编著. —北京:冶金工业出版社, 1996.

ISBN 7-5021-1858-2

I. 高…, II. 王… III. 岩石力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 05087 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
河北省固安印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
1996 年 4 月第 1 版, 1996 年 4 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32; 9.25 印张; 245 千字; 283 页; 1-500 册
15 元

前 言

在工作过程中，我结识了许多工程技术人员、科研设计人员和高等院校师生，这些同行们普遍认为，岩石力学与工程近几年来有了迅速的发展，是一个十分活跃的学术领域。学习和掌握这一领域的新理论新方法，解决工程实际问题是形势的需要。但是，国内外岩石力学与工程发展的文献资料大多数都分散在专业学术会议的论文集中，一般读者较难得到，并且学术论文具有少而精的特点，不适合大多数人员系统学习的需要，因此，得到一本简明扼要、观点新颖且内容涉及岩石力学理论与工程应用发展动态的书籍是许多工作同行的愿望。为了实现这一愿望，作者对多年的科研成果和教学经验进行了全面总结，几经努力完成了本书，以飨读者。

本书的内容涉及五大部分：岩石分级和聚类分析、岩石断裂力学和损伤理论基础、岩石的塑性和粘性理论和块体理论的基本原理。每一部分都包括基本概念、基本理论、计算方法、应用实例或应用前景等内容。书中精选了若干对解决工程实际问题有意义的图表、实例及其分析。例如， $k=5$ 时建议的矿山围岩稳定性分级表（表 1-17）；某工程样本的分级模式的模糊识别（例 1.5.3）；岩石点荷载强度公式（式 2-124）的论证和应用；含多排闭合断续节理岩体的初裂强度的计算（式 2-147）；弹性衬砌支护竖井井筒围岩与衬砌应力和位移的解答；粒状土强度的可靠性分析（表 4-1）等。这些内容实质上都是解决具体岩体工程问题的模式。

岩石力学发展的广阔前景就在于它是一门应用性和实践性很强的工程基础学科，但是由于岩体工程的复杂和引用了其他学科的新理论，使得岩石力学理论本身也存在着模型复杂、测试困难、公式繁琐等情况。为了消除岩石力学理论难学的模糊认识，本书

注重深入浅出和工程应用，为了实现这一目的，书中对概念给予较详细的定义，理论叙述简明扼要，各章附有思考题，以加深对基本观点的理解和认识。对于不同学术观点的理论，给定相同的已知条件，通过具体的计算进行比较。例如，对于圆形巷道围岩弹塑性分析的问题，进行了传统解答和体积应变不为零解答的比较，从而反映出理论的进步。在工程应用方面，除给出了部分算例和工程简化模型外，还比较详细地介绍了研究某些具体课题的实施步骤，例如对矿山或岩体工程进行岩石分级的方法步骤，节理岩体强度的确定等。希望本书能够成为一座连接岩石力学基础理论和岩体工程实际问题的桥梁，因此取名为《高等岩石力学理论》。

本书引用了许多位专家学者发表的文献资料，在此表示衷心的感谢。

东北大学林韵梅教授、徐小荷教授、陈宝智教授和沈阳工业学院翟萍副教授对本书进行了认真细致的审阅，并提出了宝贵的修改意见，在此基础上作者作了若干改进。在本书即将出版之际，本人谨对他们的真诚帮助表示衷心的感谢。

衷心感谢徐忠义编辑，他的忘我工作和认真负责的精神，大大地提高了出版进度和质量。

由于个人的学识和水平所限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

王维纲

1996年1月28日于东北大学

目 录

绪论	(1)
1 岩石分级和聚类分析	(6)
1.1 岩石分级的发展	(6)
1.1.1 国际上的两个分级系统	(6)
1.1.2 三个单项岩石分级和岩石三性综合分级	(7)
1.1.3 岩石分级的发展问题	(10)
1.2 聚类分析梗概及其基础知识	(12)
1.2.1 聚类分析简介	(12)
1.2.2 变量的类型	(12)
1.2.3 距离	(13)
1.2.4 相似系数	(15)
1.2.5 聚类分析的方法	(17)
1.3 系统聚类法	(18)
1.3.1 基本步骤和八种系统聚类法	(18)
1.3.2 统一的递推公式	(21)
1.3.3 系统聚类法的实施步骤	(22)
1.3.4 八种方法的比较	(26)
1.4 动态分级法	(27)
1.4.1 基本原理	(27)
1.4.2 <i>DT</i> 法的实施步骤	(28)
1.4.3 <i>DT</i> 法的分类函数 <i>DS</i>	(30)
1.4.4 <i>DT</i> 法的特点	(31)
1.5 模糊分级法	(33)
1.5.1 模糊集	(33)

1.5.2	模糊关系	(37)
1.5.3	利用模糊等价关系的分类法 (FSYS 法)	(39)
1.5.4	模糊动态分级法	(41)
1.5.5	岩石分级模式的模糊识别	(46)
1.6	分级判据的论证	(46)
1.6.1	候选指标的相关分析	(48)
1.6.2	变量的分类	(51)
1.6.3	变量组合的可靠性分析	(51)
2	岩石断裂力学和损伤理论基础	(54)
2.1	断裂力学的基本概念	(54)
2.1.1	断裂力学的形成和发展	(54)
2.1.2	断裂力学的研究内容和分类	(55)
2.1.3	裂纹的基本类型	(56)
2.2	裂纹端部的应力、位移及应力强度因子	(57)
2.2.1	I 型裂纹	(57)
2.2.2	II 型裂纹	(61)
2.2.3	III 型裂纹	(62)
2.3	应力强度因子的计算问题	(63)
2.3.1	叠加原理的应用	(63)
2.3.2	有限宽板有穿透直裂纹的情况	(67)
2.3.3	无限体中有椭圆片裂纹和圆片裂纹的情况	(68)
2.3.4	有限体有表面裂纹或埋藏裂纹的情况	(70)
2.3.5	部分常用应力强度因子计算公式	(71)
2.4	塑性区修正	(75)
2.4.1	塑性区的形状和大小	(75)
2.4.2	应力松弛对塑性区宽度的影响	(77)
2.4.3	应力强度因子的修正	(79)
2.5	线弹性断裂力学的基本理论	(82)
2.5.1	英格利斯 (Inglis) 断裂理论	(82)

2.5.2	格里菲斯能量理论及能量判据	(84)
2.5.2	欧文 (Irwin) 断裂准则	(86)
2.6	断裂韧度及其测试	(90)
2.6.1	断裂韧度及其影响因素	(90)
2.6.2	金属材料 K_{Ic} 的测试	(91)
2.6.3	岩石断裂韧度 K_{Ic} 的测试	(99)
2.6.4	对岩石断裂韧度测试问题的看法	(103)
2.7	复合裂纹的断裂判据	(105)
2.7.1	最大切向拉应力判据 (MS 判据)	(105)
2.7.2	最大能量释放率判据 (MG 判据)	(108)
2.7.3	最小应变能密度因子判据 (S 判据)	(110)
2.8	岩石断裂力学的应用	(115)
2.8.1	点荷载强度公式	(115)
2.8.2	格里菲斯理论在岩石力学中的应用	(117)
2.8.3	节理岩体强度的确定	(118)
2.9	岩体的损伤模型	(123)
2.9.1	损伤理论和岩体损伤	(123)
2.9.2	损伤变量和有效应力	(124)
2.9.3	应变等价原理	(125)
2.9.4	岩体损伤变量的确定	(126)
3	岩石的塑性和粘性理论	(128)
3.1	材料的塑性及其试验结果分析	(128)
3.1.1	塑性和塑性力学的基本假设	(128)
3.1.2	金属材料的试验	(129)
3.1.3	岩石类材料的试验	(131)
3.2	应力状态和应变状态简述	(133)
3.2.1	应力状态	(133)
3.2.2	应变状态	(144)
3.2.3	广义虎克定律的分解	(146)

3.3	塑性本构关系	(148)
3.3.1	屈服条件的函数形式和几何图形	(149)
3.3.2	加载条件	(160)
3.3.3	塑性本构方程	(164)
3.4	简单弹塑性问题	(176)
3.4.1	薄壁圆筒受拉伸与扭转的增量理论解	(176)
3.4.2	厚壁圆筒受内外压力问题的弹塑性解答	(182)
3.5	圆形巷道的弹塑性分析	(186)
3.5.1	圆形巷道围岩弹塑性分析的传统解答	(186)
3.5.2	体积应变不为零的圆形巷道围岩弹塑性 位移解答	(190)
3.6	岩石的粘弹性问题	(198)
3.6.1	流变性的表达方式	(198)
3.6.2	微分形式的流变模型	(200)
3.6.3	一维流变模型的积分形式	(212)
4	岩体工程的可靠性分析	(222)
4.1	可靠性的概念	(222)
4.2	极限状态方程式	(224)
4.3	对随机变量的描述	(225)
4.4	工程结构设计的数学模型	(230)
4.4.1	安全系数法	(231)
4.4.2	全分布概率法	(232)
4.5	一次二阶矩法	(236)
4.5.1	失效概率影响因素的分析	(236)
4.5.2	中心点法	(238)
4.5.3	验算点法	(247)
4.6	可靠性分析在岩土工程中的应用	(254)
4.6.1	锚索抗力统计参数对可靠度的影响	(254)
4.6.2	粒状土强度的可靠性分析	(255)

4.6.3	岩土工程设计的有关问题	(257)
5	块体理论的基本原理	(262)
5.1	块体理论及其基本假设	(262)
5.1.1	问题的提出	(262)
5.1.2	块体理论的基本假设	(264)
5.2	块体和切割锥	(264)
5.2.1	块体的类型及其定义	(264)
5.2.2	岩体切割锥	(266)
5.3	共点图案判断法	(267)
5.3.1	块体和切割锥的表示方法	(267)
5.3.2	共点图案判断法	(269)
5.4	三维识别方法	(271)
5.4.1	有限性定理	(271)
5.4.2	判别块体有限的空间解析几何方法	(274)
5.4.3	判别块体有限的赤平投影方法	(276)
5.4.4	可动性定理	(278)
5.4.5	关键块体的特征	(280)

绪 论

岩石力学是为解决岩体工程的各种理论和方法问题而发展起来的新兴工程基础学科，它的应用性和实践性很强。对于工程技术，它是矿山工程、水电工程等岩体工程的技术基础。对于基础科学，它是固体力学和地质学的应用学科。

为了加深对本学科的理解，有必要对岩石力学学科发展的几个认识问题加以探讨。

1. 对岩石力学的认识

美国科学院岩石力学委员会 1966 年对岩石力学给予如下的定义：“岩石力学是研究岩石的力学性能的理论 and 应用的科学，是探讨岩石对其周围环境中力场的反应力学分支。”

现代社会对岩石力学的认识逐渐深化，提出岩石力学是开发资源的钥匙。空间资源、矿产资源和能源的开发与利用都离不开岩石力学的理论和方法，资源利用程度的提高也对岩石力学理论提出了更高的要求。

由此看出，岩石力学区别于其他学科的重要特点是：

(1) 岩石力学的研究对象是赋存于地壳中与工程相联系的岩体，是极其复杂的介质。

(2) 该学科属于力学分支，其理论和方法涉及固体力学、流体力学、计算数学、工程地质专业学科等多个领域。

(3) 包含理论和应用两部分内容，介于工程应用于科学技术理论之间的学科，既是力学的应用，又是施工技术的基础。高等岩石力学理论探讨的问题更接近于工程实际，它的模型更加复杂。因而它的研究领域涉及许多具体的工程技术问题。

2. 岩石力学所涉及的工程

(1) 采矿工程：

1) 边坡的稳定性及其加固技术；

- 2) 井巷及采场围岩的稳定性分析;
- 3) 采矿过程的地压控制;
- 4) 瓦斯突出和岩爆问题;
- 5) 采空区处理和地面沉降问题;
- 6) 岩石破碎及动力学问题。

(2) 水电工程。

(3) 铁路和公路工程。

(4) 核废料处理工程。

(5) 石油钻探工程。

(6) 建筑地基工程。

(7) 热能开发工程。

(8) 地震预报。

(9) 空间资源开发工程。

3. 岩石力学发展历史的回顾

岩石力学是伴随着采矿、土木等岩体工程的建设 and 力学等学科的进步而逐步发展而形成的新兴学科,按其发展进程可划分四个阶段:

(1) 初始阶段(20世纪以前):这是岩石力学产生的萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的问题。例如,1878年海姆(A. Heim)提出了水平分力和竖直分力相等的见解,引起了人们对地应力问题的重视。

(2) 经验理论阶段(20世纪初~30年代):该阶段出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论就是普氏(M. M. Промоляконов)提出的自然平衡拱学说。该理论认为,围岩开挖后自然塌落成抛物线拱形,作用在支架上的压力等于冒落拱内岩石的重量,仅是上覆岩石重量的一部分。显然,这些理论对生产实践有重要的指导意义。

(3) 经典理论阶段(20世纪30年代~60年代):这是岩石力学学科形成的重要阶段,弹性力学和塑性力学被引入岩石力学,确

立了一些经典计算公式，形成围岩与支护共同作用的理论。结构面对岩体力学性质的影响受到重视，岩石力学文献和专著的出版，试验方法的完善，岩体工程技术问题的解决，这些都说明岩石力学发展到该阶段已经形成了一门独立的学科。

在经典岩石力学理论形成的过程中，很多学者进行了卓越的工作，可以列举许多事例和文献来说明这一问题。例如，金尼克（А. Н. Динник）提出的原岩应力公式，芬纳（R. Fenner）、施米特（H. Schmid）和卡斯特奈（H. Kaster）等人对围岩应力和位移分布公式所作的贡献，太沙基（Terzaghi）在结构面对岩体稳定性影响等方面所做的研究以及塔洛布尔（J. Talobre）和秦巴列维茨（П. П. ценбаревич）出版的岩石力学专著等等，特别应当提到的是奥地利萨尔茨堡（Salzburg）派学者所取得的成就。以斯梯尼（J. Stini）和米勒（L. Müller）为首的学者强调应对结构面对岩体的影响进行定性和定量地分析，并致力于工程地质和力学理论的结合，以解决岩体工程问题。1951年在萨尔茨堡举行了第一届地质力学讨论会，并约定定期举行岩石力学学术会议，一直延续至今。

除此之外，德国、英国、法国、前苏联、葡萄牙、意大利、挪威、美国、中国、加拿大、澳大利亚、日本和南非等国都很重视岩石力学的研究，并在理论、试验技术和工程实践等领域取得了相应的成果。1962年10月在第13届地质力学学术讨论会上成立了国际岩石力学学会，这是岩石力学发展史上的重要事件。

（4）现代发展阶段（20世纪60年代~现在）：此阶段是岩石力学理论和实践的新进展阶段，其主要特点是，用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩石力学问题，把力学、物理学、系统工程等的最新成果引入了岩石力学，而电子计算机的广泛应用为流变学、断裂力学、非连续介质力学、数值方法、人工智能、分形理论等在岩石力学与工程的应用提供了可能。

更引人注目的是中国的岩石力学与工程已经开始步入国际学术的讲坛。中国岩石力学与工程学会自1985年6月19日成立后，

创办了岩石力学与工程学报并成功地举行三届全国岩石力学学术讨论会。90年代前后各单位在北京、西安、宜昌、沈阳和广州等地召开国际岩石力学学术会议，为学科发展做出了贡献。

当代科学技术的飞速发展极大地促进了生产力的提高，生产活动的深入又给科学技术提出了层出不穷的新课题。因此，走向21世纪的科学技术包括岩石力学正处于一个蓬勃发展时期。可以预言，在耗散结构理论、协同学及突变理论的思维方法启迪下，岩石力学与工程将取得更大的成果，高等岩石力学理论将从中汲取更多的精华。

4. 对岩石力学研究途径的几点看法

岩石是一种十分复杂的地球介质，它的复杂性、模糊性和不确定性已逐渐被人们所认识。岩石力学发展的历史表明，单纯借用或套用固体力学或其他学科的概念和方法，难以解决岩石力学的工程应用问题。其他学科的理论和技术只能作为一种手段和工具在岩石力学与工程中应用，而岩石力学学科的发展应当有自己的概念和系统。研究对象的复杂性和模糊性迫使人们重新考虑岩石力学的突破口。传统的固体力学以应力为中心，通过一定边界条件下的外力根据本构关系来求解应力。但岩体和人造材料明显不同，它的本构方程复杂，边界条件很难确定。而且本构关系愈接近实际情况，所需的力学参数愈多，这又给测试增加了新的问题，所以要得到接近真实情况的应力困难重重。因此，应当把岩石看作独立于其他材料的系统，研究这样一个系统应当有岩石力学独特的思维，这就是认识岩石力学参数的模糊性和不确定性，建立以位移为中心，判断工程稳定性为目的的体系。而这样的体系由无数个岩体工程组成，在一个个的工程上通过位移（或其他易测参数）测试建立模型，进行设计和施工，通过检测和其他信息进一步修改模型，改进施工。物理模型复杂时可以建立经验方程。从经验方程中选取易测的影响稳定性的主要因素作为参数。仅分析方法为这种体系的建立奠定了基础，岩石分级的发展为这种体系的建立准备了条件，任何复杂的事物都可以分解成众多的简单

事物，解决了一个个的简单问题，就可以找到包含简单事物的复杂事物的规律，岩石力学也应当遵循这一规律。

思 考 题

- (1) 与其他力学分支相比岩石力学有何特点？
- (2) 结合岩石力学学科的发展历史和工程实践的需要，谈谈你对岩石力学与工程发展战略的新看法。

1 岩石分级和聚类分析

岩石分级是岩石力学的传统课题，但经典的分级主要依靠专业知识和生产经验，很少用到数学方法。由于科学技术的发展已形成了一门专门研究运用数学方法进行类别划分和各类亲疏程度的边缘学科，称之为聚类分析或数值分类学。本章介绍聚类分析方法及其在岩石分级中的应用。

1.1 岩石分级的发展

岩石分级伴随着资源开发的步伐已经走过了二百多年，现在岩石分级不但成为解决岩体工程问题的重要方法之一，而且已经作为国家标准正式颁布。因此，通过重要岩石分级的介绍来探求其发展是十分必要的。

应当指出，岩体工程的分级对象是工程岩体或围岩，考虑到传统文献的习惯，本书在论述分级时沿用了岩石分级这一术语，而未对岩石分级和岩体分级给予区别，而在其他场合，岩石和岩体指的是两个不同的专门概念。另外需要说明的是，分级在某种意义上指的是有序的分类。

1.1.1 国际上的两个分级系统

70年代以来，岩石分级发展到定量阶段，各种分级方法都用定量数值来表示岩体的相应性质或特征，并设法将各单项数值通过简单的运算得到岩体质量常数，根据岩体质量常数在分级表中的位置来确定级别。国际上最有影响的有两大分级系统，其一是由巴顿（Barton）等人发展的岩体质量分级法（Quantitative Classification of Rock Mass），又称Q系统。其二是由宾尼亚夫斯基（Bieniawski）提出的地质力学分级法（Geomechanics Classification System），又称RMR法。

Q系统用岩体质量数Q进行分级，并且

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1-1)$$

式中 RQD —— 岩体质量指标, %;

J_n —— 节理组系数;

J_r —— 节理面粗糙度系数;

J_a —— 节理蚀变程度系数;

J_w —— 地下水影响系数;

SRF —— 地应力影响系数。

RQD 值由地质钻探岩芯编录确定, 其余指标根据现场调查情况从相应的评分表中获取。 Q 值的范围从小于 0.01 直到大于 400, 其值愈大, 岩体的质量愈好。

RMR 法根据岩石单轴抗压强度、 RQD 、节理间距、节理状态和地下水五个因素分别进行评分, 对所得的分值之和按照节理的产状和工程类型加以修正, 即得到岩体质量分数 RMR (Rock Mass Rating), 按 RMR 的大小进行分级, 取值范围 0~100, 其值愈大, 质量愈好。

1.1.2 三个单项岩石分级和岩石三性综合分级

80 年代以来, 我国学者在岩石分级的理论和实践方面取得了重要成果, 主要表现在岩石可钻性、岩石稳定性和岩石爆破性三个单项岩石分级的发表, 岩石三性综合分级的研究, 分级三要素法则等。这些成果往前可以追溯到 50 年代“论我国岩石分级”的工作, 往后可以一直延伸到工程岩体国家标准的制定和应用。

1.1.2.1 岩石凿碎法可钻性分级

费寿林等人提出的岩石凿碎法可钻性分级 (1980 年) 用于测定岩石的可钻性。该分级采用标准的岩石凿测器来模拟冲击式凿岩的物理过程 (图 1-1), 通过足够的测试次数用统计的方法取得稳定的试验数据。凿测器的落锤重 4kg, 从 1m 高沿导向杆自由落下撞击钎头, 凿入平整的岩石试件, 统计凿入 480 次的平均凿深 H , 每次转角 15° , 钎头为一字形, $d=40\text{mm}$, 镶嵌 YG—11CK 的 O113 型硬质合金片, 刃角 110° , 刃锋尖利, 通过 H 计算凿碎比

功 a ，即

$$a = \frac{14545}{H} = \frac{A}{V} \quad (1-2)$$

式中 H —— 总冲击功；

V —— 破岩体积；

H —— 平均凿入深度（480次的），mm；

a —— 凿碎比功，J/cm³。

用读数显微镜直接读出钎刃磨钝宽度 b (mm)，精确到 0.1mm，读值时在离钎刃两端 4mm 处起算。采用 3 个以上岩石试件，取算术平均值求得分级样本的 a 、 b 值，按表 1-1 和表 1-2 确定该样本的可钻性级别，磨蚀性的级别以下角标的形式表示。现在测试方法已有改进，用电动微型凿测器代替标准凿测器。

表 1-1 可钻性级别

级 别	凿碎比功, a J/cm ³	软硬程度
I	≤186	极软
II	187~284	软
III	285~382	中等
IV	383~480	中硬
V	481~578	硬
VI	579~676	很硬
VII	≥677	极硬

表 1-2 磨蚀性级别

级 别	钎刃磨钝宽度, b mm	磨蚀性
1	≤0.2	弱
2	0.3~0.6	中
3	≥0.7	强

1.1.2.2 岩石爆破性分级

钮强等在 1984 年提出了用爆破性指标 N 进行岩石爆破性分级的方法，分级时需要测试岩体波阻抗 $\rho \cdot V_m$ 、爆破漏斗体积 V 、